TP 14367F

Évaluation des défauts de protection thermique de wagons-citernes : mise à jour du modèle thermique par des essais au feu

RAPPORT SOMMAIRE

Préparé pour le

Centre de développement des transports
de
Transports Canada

par

A.M. Birk Engineering
Kingston, Ontario, Canada

Mars 2005

106-02013/

TP 14367F

Évaluation des défauts de protection thermique de wagons-citernes : mise à jour du modèle thermique par des essais au feu

RAPPORT SOMMAIRE

par

A.M. Birk
A.M. Birk Engineering
Kingston, Ontario, Canada

Mars 2005

Les opinions et les vues exprimées dans ce rapport sont celles des auteurs et ne reflètent pas nécessairement celles du Centre de développement des transports de Transports Canada ou des organismes parrains.

Ce rapport n'utilise pas toujours les unités du Système international, étant donné que certaines des unités utilisées dans le secteur d'activités concerné appartiennent au Système impérial.

Tableau de conversion des unités de mesure de température

Température en °C	Température en °F
450	842
500	932
550	1 022
600	1 112
650	1 202
700	1 292
750	1 382
816	1 500

Tableau de conversion des unités de mesure de contrainte

Contrainte en MPa	Contrainte en ksi (1 000 lb/po^2)
100	14,5
125	18,1
150	21,8
175	25,4
200	29,0
225	32,6
250	36,3
300	43,5

A translation of this report is also available in English: *Tank-Car Thermal Protection Defect Assessment: Updated Thermal Modelling with Results of Fire Testing – Summary Report*, TP 14367E.

Transports Canada Transport Canada

FORMULE DE DONNÉES POUR PUBLICATION

1. N° de la publication de Transports Canada	2. N° de l'étude	3. N° de catalogue du destinataire
TP 14367F	9997, 5378	

4. Titre et sous-titre

Évaluation des défauts de protection thermique de wagons-citernes : mise à jour du modèle thermique par des essais au feu
Rapport Sommaire

5. Date de la publication

Mars 2005

6. N° de document de l'organisme exécutant

7. Auteur(s)

A.M. Birk

8. N° de dossier - Transports Canada

2450-EP654-3

9. Nom et adresse de l'organisme exécutant

A.M. Birk Engineering
633 Forest Hill Drive
Kingston, Ontario
Canada K7M 7N6

10. N° de dossier - TPSGC

MTB-0-01870

11. N° de contrat - TPSGC ou Transports Canada

T8200-000543/001/MTB

12. Nom et adresse de l'organisme parrain

Centre de développement des transports (CDT)
800, boul. René-Lévesque Ouest
Bureau 600
Montréal (Québec)
H3B 1X9

13. Genre de publication et période visée

Rapport sommaire

14. Agent de projet

A. Vincent

15. Remarques additionnelles (programmes de financement, titres de publications connexes, etc.)

Coparrainé par la Direction générale du transport des marchandises dangereuses

16. Résumé

Ce rapport donne un aperçu des travaux d'analyse des défauts de protection thermique de wagons-citernes transportant des gaz de pétrole liquéfiés (GPL). Ces travaux ont comporté des essais de rupture par fluage à haute température d'aciers utilisés dans la fabrication des wagons-citernes, la modélisation informatique de cas d'exposition au feu de wagons-citernes présentant des défauts de protection thermique et des essais au feu de citernes de 500 gallons (1 890 L) dans lesquelles des défauts de protection thermique avaient été introduits.

Les essais au feu ont révélé que même des défauts de dimensions relativement faibles peuvent entraîner la rupture de la citerne si la zone défectueuse est soumise à un feu intense, sans être mouillée par la phase liquide. La modélisation thermique a montré que les dimensions admissibles d'un défaut dépendent de l'état du reste du système de protection thermique. Il est difficile de définir les limites exactes d'un défaut admissible. D'après les données recueillies et les analyses effectuées, les dimensions d'un défaut deviennent critiques autour de 1,2 m de longueur dans l'axe de la citerne sur environ 0,4 m de largeur. Un tel défaut peut théoriquement mener à la rupture du wagon-citerne s'il est situé dans l'espace vapeur de la citerne et si celle-ci est enveloppée par les flammes. L'étendue totale admissible des défauts dépend de l'état du reste du système de protection thermique. Selon ce que l'on sait de l'état des systèmes de protection thermique des wagons-citernes, la surface totale admissible des défauts serait de l'ordre de 1 p. 100 à 9 p. 100 de la surface de la citerne.

17. Mots clés	18. Diffusion
Défauts de protection thermique de wagons-citernes, altération par le feu, modélisation thermique, essai au feu, sommaire	Le Centre de développement des transports dispose d'un nombre limité d'exemplaires.

19. Classification de sécurité (de cette publication)	20. Classification de sécurité (de cette page)	21. Déclassification (date)	22. Nombre de pages	23. Prix
Non classifiée	Non classifiée	—	xiv, 38	Port et manutention

Transport Canada / Transports Canada

PUBLICATION DATA FORM

1. Transport Canada Publication No.	2. Project No.	3. Recipient's Catalogue No.
TP 14367F	9997, 5378	

4. Title and Subtitle	5. Publication Date
Évaluation des défauts de protection thermique de wagons-citernes : mise à jour du modèle thermique par des essais au feu Rapport Sommaire	March 2005
	6. Performing Organization Document No.

7. Author(s)	8. Transport Canada File No.
A.M. Birk	2450-EP654-3

9. Performing Organization Name and Address	10. PWGSC File No.
A.M. Birk Engineering 633 Forest Hill Drive Kingston, Ontario Canada K7M 7N6	MTB-0-01870
	11. PWGSC or Transport Canada Contract No.
	T8200-000543/001/MTB

12. Sponsoring Agency Name and Address	13. Type of Publication and Period Covered
Transportation Development Centre (TDC) 800 René Lévesque Blvd. West Suite 600 Montreal, Quebec H3B 1X9	Summary
	14. Project Officer
	A. Vincent

15. Supplementary Notes (Funding programs, titles of related publications, etc.)

Co-sponsored by Transport Canada's Transport Dangerous Goods Directorate

16. Abstract

This summary report gives an overview of the work done on the analysis of thermal protection defects on railway tank-cars carrying LPG (liquefied petroleum gas). The work included high temperature stress-rupture testing of tank-car steels, computer modelling of tank-cars with thermal protection defects in fires, and fire testing of 500 gal. (1890 L) tanks with simulated thermal protection defects.

The fire testing showed that even relatively small defects can result in tank rupture if the defect area is engulfed in a severe fire and is not wetted by liquid. The thermal modelling showed that the allowable defect size depends on the condition of the remaining thermal protection system. It is difficult to define an exact limit of allowable defect. Based on the data obtained and the analysis conducted, the critical defect size is around 1.2 m long along the tank-car axis by about 0.4 m wide. A defect this small can theoretically result in tank-car rupture if it is located in the tank car vapour space and if the tank-car is engulfed in fire. The total allowable defect area depends on the condition of the remaining thermal protection system. For the expected condition of tank car thermal protection systems, the allowable total area of defects is in the range of 1 to 9 percent of the tank surface area.

17. Key Words	18. Distribution Statement
Tank-car thermal protection defects, fire impingement, thermal modelling, fire testing, summary	Limited number of copies available from the Transportation Development Centre

19. Security Classification (of this publication)	20. Security Classification (of this page)	21. Declassification (date)	22. No. of Pages	23. Price
Unclassified	Unclassified	—	xiv, 38	Shipping/ Handling

Remerciements

Ces travaux ont été financés par la Direction générale du transport des marchandises dangereuses et le Centre de développement des transports de Transports Canada.

Sommaire

Ce rapport donne un aperçu des travaux d'analyse des défauts de protection thermique de wagons-citernes transportant des gaz de pétrole liquéfiés (GPL). Ces travaux ont comporté des essais de rupture par fluage à haute température d'aciers utilisés dans la fabrication des wagons-citernes, la modélisation informatique de cas d'exposition au feu de wagons-citernes présentant des défauts de protection thermique et des essais au feu de citernes de 500 gallons (1 890 L) dans lesquelles des défauts de protection thermique avaient été introduits.

Les systèmes de protection thermique sont conçus pour protéger les wagons-citernes transportant des marchandises dangereuses contre une altération accidentelle par le feu. Ces wagons-citernes sont conçus pour résister à la rupture pendant 100 minutes dans un feu dit «en nappe», ou pendant 30 minutes lorsque exposés à ce qu'il est convenu d'appeler une «flamme de chalumeau». Un des systèmes de protection thermique courants comprend un matelas isolant de fibre céramique haute température de 13 mm d'épaisseur recouvert d'une jaquette en acier de 3 mm. Des inspections récentes [1] ont révélé des défauts importants dans le système de protection thermique de certains wagons-citernes. Les présents travaux avaient pour but de déterminer jusqu'à quelles dimensions un défaut peut être acceptable du point de vue de la sécurité.

Les essais au feu [2] ont révélé que même des défauts de dimensions relativement faibles peuvent entraîner la rupture de la citerne si la zone défectueuse est soumise à un feu intense, sans être mouillée par la phase liquide. La modélisation thermique [3] a montré que les dimensions admissibles d'un défaut dépendent de l'état du reste du système de protection thermique, car cet état détermine la vitesse à laquelle le niveau de liquide baissera lors d'une exposition au feu. Un défaut doit être situé dans l'espace vapeur pour causer la rupture de la citerne. Cela en supposant, bien sûr, que la citerne est exempte de faiblesses, de fissures de fatigue, de défauts de soudure et de corrosion.

Il est difficile de définir les limites exactes d'un défaut admissible. D'après les données recueillies et les analyses effectuées, les dimensions d'un défaut deviennent critiques autour de 1,2 m de longueur dans l'axe de la citerne sur environ 0,4 m de largeur. Si la zone défectueuse est plus petite, elle sera refroidie par la paroi protégée qui l'entoure. Mais si elle est égale ou supérieure à ces dimensions critiques, elle pourra atteindre des températures qui occasionneront la rupture de la citerne. L'étendue totale admissible des défauts dépend de l'état du reste du système de protection thermique. Selon ce que l'on sait de l'état des systèmes de protection thermique des wagons-citernes, la surface totale admissible des défauts serait de l'ordre de 1 p. 100 à 9 p. 100 de la surface de la citerne.

Les conclusions formulées ci-après ont été tirées des essais au feu de citernes de 500 gallons présentant des défauts de protection thermique et de la modélisation informatique de wagons-citernes de type 112J avec défauts.

i) Les essais au feu de citernes de propane de 500 gallons présentant des défauts de protection thermique simulés ont révélé que même des petits défauts peuvent mener à la rupture de la citerne.

ii) Les essais au feu de citernes de 500 gallons présentant des défauts de protection thermique simulés ont permis de déterminer qu'un défaut d'aussi faibles dimensions que 1,2 m de longueur (dans l'axe de la citerne) sur environ 0,4 m de largeur est suffisant, en théorie, pour entraîner un amincissement localisé de la paroi et une rupture par fluage dans un wagon-citerne de type 112J dont le diamètre est de 3 m et la paroi, épaisse de 16 mm. Cela en supposant une contrainte périphérique d'environ 190 MPa.

iii) Un défaut de protection thermique ne constitue un problème, lors d'une exposition à un feu enveloppant, que s'il est situé dans l'espace vapeur. En d'autres mots, le niveau du liquide par rapport à l'emplacement du défaut est un facteur important.

La modélisation thermique a mené aux conclusions suivantes :

i) Les essais au feu de citernes de propane de 500 gallons (dans deux configurations : citerne de référence et citerne avec protection thermique défectueuse) menés en 2004 ont permis de valider de façon satisfaisante le code IDA 2.1.

ii) Les résultats obtenus avec le code IDA 2.1 concordent raisonnablement avec les résultats des essais au feu RAX 201 [4] d'un wagon-citerne en vraie grandeur sans protection thermique.

iii) Certains écarts ont été constatés entre la modélisation IDA 2.1 et les résultats d'essais. Ainsi, le code IDA 2.1 a tendance à surestimer la vitesse de montée en température de la paroi, et, par conséquent, à devancer de quelques minutes le moment de rupture, par rapport aux résultats des essais. Cet écart peut s'expliquer en partie par la façon dont le feu est modélisé. En effet, un feu réel n'atteint pas instantanément sa pleine intensité, tandis que dans le code IDA, le feu est à 100 p. 100 dès le moment 0.

iv) Le modèle semble faire des prévisions raisonnables et prudentes de la rupture de la citerne.

Les conclusions ci-après ont été formulées à partir de la modélisation de wagons-citernes présentant des défauts de protection thermique. Il avait été supposé, à la lumière des résultats des essais au feu de 2004, qu'un défaut d'isolation est critique lorsqu'il mesure 1,2 m dans l'axe du wagon-citerne (112J) sur 0,4 m de largeur.

i) Un défaut de protection thermique de dimensions critiques peut entraîner la rupture de la citerne, lors d'une exposition à des flammes enveloppantes, s'il est situé dans l'espace vapeur du wagon-citerne.

ii) La rupture d'un wagon-citerne qui comporte des défauts de protection thermique ne dépend pas seulement des dimensions et de l'emplacement des défauts, mais

aussi de la qualité du reste de la protection (y compris toutes les liaisons thermiques entre la jaquette et le récipient intérieur de la citerne). Meilleure est la protection thermique de la citerne, plus elle est capable de survivre, malgré des défauts localisés de cette protection. C'est que l'ensemble de la protection thermique détermine la vitesse à laquelle le niveau de liquide baisse dans la citerne lorsqu'elle est exposée au feu.

iii) L'étendue totale admissible des zones défectueuses est très fortement tributaire de la moyenne surfacique des propriétés de conductance thermique (c.-à-d. k/w, où k = conductivité thermique et w = épaisseur de l'isolant) du matériau isolant lors d'une exposition au feu. Cette valeur de conductivité thermique d'un matelas isolant en fibre céramique haute température exposé au feu est estimée entre 0,15 et 0,30 W/mK.

iv) Une citerne protégée par un matelas isolant en fibre céramique de 13 mm d'épaisseur affichant une moyenne surfacique de conductivité thermique de 0,15 W/mK (dans des conditions d'exposition au feu) peut probablement admettre des défauts de protection thermique sur 8 p. 100 à 9 p. 100 de sa surface. Cela en supposant au moins un défaut critique dans l'espace vapeur. En supposant également que la soupape de sûreté a une capacité d'écoulement supérieure à environ 5 000 pi^3/min, à 110 p. 100 de sa pression d'ouverture (supposée ici à 280,5 lb/po^2 de pression manométrique).

v) Une citerne protégée par un matelas isolant en fibre céramique de 13 mm d'épaisseur affichant une moyenne surfacique de conductivité thermique de 0,20 W/mK (dans des conditions d'exposition au feu) peut probablement admettre des défauts de protection thermique sur 4 p. 100 de sa surface. Cela en supposant au moins un défaut critique dans l'espace vapeur. En supposant également que la soupape de sûreté a une capacité d'écoulement supérieure à environ 4 000 pi^3/min, à 110 p. 100 de sa pression d'ouverture (supposée ici à 280,5 lb/po^2 de pression manométrique).

vi) Une citerne protégée par un matelas isolant en fibre céramique de 13 mm d'épaisseur affichant une moyenne surfacique de conductivité thermique de 0,30 W/mK (dans des conditions d'exposition au feu) ne peut probablement admettre aucun défaut critique (c.-à-d. mesurant plus de 1,2 m dans l'axe de la citerne sur 0,4 m de largeur). Cette conductivité thermique efficace est la valeur maximale admissible pour un matelas isolant de 13 mm d'épaisseur qui respecte les paramètres des essais standard sur plaque des systèmes de protection thermique. Lorsqu'une citerne affiche une moyenne surfacique de conductivité thermique de cet ordre, une soupape de sûreté dont la capacité d'écoulement est de 3 500 pi^3/min est probablement inadéquate (la capacité d'écoulement est trop faible).

vii) Si la citerne ne comporte aucun défaut de plus de 1,2 m sur 0,4 m, on peut admettre des défauts couvrant une plus grande surface, mais la surface maximale doit être déterminée au cas par cas, en appliquant le code IDA 2.1 à la citerne en question. Il faut alors prélever des éprouvettes d'isolant afin de mesurer les

indices *k* réels. Au moins 10 éprouvettes doivent être prélevées de façon que l'indice *k* soit véritablement représentatif.

viii) Aucun défaut ne doit être admis dans les wagons-citernes de type 112J équipés de soupapes de sûreté de 3 500 pi^3/min, à moins que l'on puisse caractériser avec précision les propriétés de la protection thermique globale.

Le lecteur doit se rappeler que les cas suivants n'ont pas été pris en compte dans l'étude :

i) ruptures aux extrémités
ii) soupapes de sûreté défectueuses
iii) défauts dans le récipient intérieur
iv) corrosion
v) dommages dus à un impact
vi) feux de type «flamme de chalumeau»
vii) citernes renversées
viii) contact direct entre la jaquette et le récipient intérieur de la citerne

Références

1. Birk AM, Cunningham MH, 1999, *Thermographic Inspection of Tank-Car Insulation: Field Test Manual,* TP 13517E, Transportation Development Centre, Transport Canada.
2. Birk AM, Poirier D, Davison C, Wakelam C, 2005, *Tank-Car Thermal Protection Defect Assessment: Fire Tests of 500-Gallon Tanks with Thermal Protection Defects,* TP 14366E, Transportation Development Centre, Transport Canada.
3. Birk AM, 2005, *Thermal Model Upgrade for the Analysis of Defective Thermal Protection Systems,* TP 14368E, Transportation Development Centre, Transport Canada.
4. Townsend W, Anderson CE, Zook J, Cowgill G, 1974, *Comparison of Thermally Coated and Uninsulated Rail Tank-Cars Filled with LPG Subjected to a Fire Environment,* FRA-OR&D 75-32, Federal Railroad Administration, U.S. Department of Transportation.

Table des matières

1.0 INTRODUCTION **1**

1.1 Contexte 1
1.2 Objectifs et portée 1
1.3 Sommaire 2

2.0 WAGONS-CITERNES EXPOSÉS AU FEU **3**

2.1 Protection thermique 3
2.2 Défauts de protection thermique 4
2.3 Comportement d'une citerne comportant des défauts de protection thermique 5
2.4 Défauts admissibles 6
2.5 Soupapes de sûreté 6
2.6 Modélisation thermique 7
2.7 Rupture par fluage 9
2.8 Essais au feu 10

3.0 ESSAIS AU FEU DE CITERNES DE PROPANE DE 500 GALLONS **11**

3.1 Dimension critique du défaut 14
3.2 Transposition des résultats d'essais 18

4.0 RÉSULTATS DE LA MODÉLISATION THERMIQUE **21**

4.1 Validation 21
4.2 Simulations de wagons-citernes 22

5.0 DISCUSSION **27**

5.1 IDA 2.1 et AFFTAC 27
5.2 Validation du code IDA 2.1 27
5.3 Emplacement du défaut 28
5.4 Capacité de la soupape de sûreté 28
5.5 Effet du niveau de remplissage 29
5.6 Propriétés de l'isolant 30

6.0 CONCLUSIONS **31**

7.0 RECOMMANDATIONS **35**

RÉFÉRENCES **37**

Liste des figures

FIGURE 1 SCHÉMA D'UNE CITERNE DE TYPE 112J PRÉSENTANT DES DÉFAUTS DE PROTECTION THERMIQUE (EN ROUGE) 8

FIGURE 2 DONNÉES DE RUPTURE PAR FLUAGE POUR L'ACIER TC 128B 9

FIGURE 3 CITERNE D'ESSAI PARTIELLEMENT RECOUVERTE D'UNE JAQUETTE EN ACIER (LE DÉFAUT EST SITUÉ SOUS LA JAQUETTE, DU CÔTÉ NON VISIBLE DE LA CITERNE) 11

FIGURE 4 CITERNE D'ESSAI DE 500 GALLONS CONFORME AU CODE DE L'ASME PLONGÉE À 25 % DANS LES FLAMMES (TEMPÉRATURE DE CORPS NOIR DU FEU : 800 À 900 °C) 12

FIGURE 5 MISE EN PRESSION DE LA CITERNE EN FONCTION DU TEMPS (CITERNE DE 500 GALLONS CONFORME AU CODE DE L'ASME PRÉSENTANT DIVERS NIVEAUX DE PROTECTION THERMIQUE, PLONGÉE À 25 % DANS LE FEU) 13

FIGURE 6 TEMPÉRATURE MAXIMALE DE LA PAROI SOUS LE DÉFAUT EN FONCTION DU TEMPS (CITERNE DE 500 GALLONS CONFORME AU CODE DE L'ASME PRÉSENTANT DIVERS NIVEAUX DE PROTECTION THERMIQUE, PLONGÉE À 25 % DANS LE FEU) 14

FIGURE 7 TEMPÉRATURES MAXIMALES MESURÉES SOUS LES DÉFAUTS DE PROTECTION THERMIQUE (PLAQUE DE 16 MM) DANS UN FEU ENVELOPPANT (TEMPÉRATURE EFFECTIVE DE CORPS NOIR = 840 °C) 15

FIGURE 8 LONGUEUR DE LA FISSURE EN FONCTION DE LA LONGUEUR DU DÉFAUT DE PROTECTION THERMIQUE (CITERNE DE 500 GALLONS, DIAMÈTRE = 0,96 M, ÉPAISSEUR DE PAROI = 7,1 MM, ACIER SA 455, LONGUEUR DE LA ZONE CHAUFFÉE PAR LE FEU = ENVIRON 1,6 M, DONNÉES TIRÉES DE LA RÉFÉRENCE [4]) 16

FIGURE 9 CITERNE COMPORTANT DES DÉFAUTS DE PROTECTION THERMIQUE SUR 15 % DE SA SURFACE, APRÈS RUPTURE 17

FIGURE 10 TEMPS JUSQU'À LA RUPTURE PRÉVU EN FONCTION DU POURCENTAGE DE SURFACE DÉFECTUEUSE ET DE LA CONDUCTIVITÉ THERMIQUE EFFECTIVE GLOBALE DU SYSTÈME DE PROTECTION THERMIQUE (EN SUPPOSANT UN MATELAS CÉRAMIQUE DE 13 MM) 26

Liste des tableaux

TABLEAU 1 SOMMAIRE DES PROPRIÉTÉS ISOLANTES DE LA FIBRE CÉRAMIQUE (UNIFRAX, ISOLANT DE WAGON-CITERNE, DENSITÉ DE 72 KG/M^3, ÉTAT NEUF [7]) 4

TABLEAU 2 SOMMAIRE DES DÉFAILLANCES OBSERVÉES DANS UNE CITERNE DE 500 GALLONS ET DONNÉES EXTRAPOLÉES POUR UN WAGON-CITERNE DE TYPE 112J 18

TABLEAU 3 SOMMAIRE DES RÉSULTATS DE LA MODÉLISATION THERMIQUE 21

TABLEAU 4 SOMMAIRE DES PRINCIPALES VARIABLES 22

TABLEAU 5 PARAMÈTRES D'UNE CITERNE COMPORTANT UN SEUL DÉFAUT IMPORTANT (WAGON-CITERNE DE TYPE 112J, CONTENANT DU PROPANE, DÉFAUT SITUÉ DANS LA PARTIE SUPÉRIEURE, 2 M DE LONGUEUR DANS L'AXE DE LA CITERNE SUR 0,75 M DE LARGEUR, REPRÉSENTANT ENVIRON 1 % DE LA SURFACE DE LA CITERNE, NIVEAU DE REMPLISSAGE DE 94 %, TEMPÉRATURE INITIALE DE LA CITERNE = 20 °C, TEMPÉRATURE DU FEU = 816 °C, CAPACITÉ DE LA SOUPAPE DE SÛRETÉ = 35 000 PI^3/MIN) 24

TABLEAU 6 PARAMÈTRES D'UNE CITERNE COMPORTANT DE NOMBREUX DÉFAUTS, DONT AU MOINS UN DÉFAUT IMPORTANT AU SOMMET DE L'ESPACE VAPEUR (WAGON-CITERNE DE TYPE 112J, CONTENANT DU PROPANE, ISOLANT DE 13 MM, CONDUCTIVITÉ THÉORIQUE DE L'ISOLANT, K = 0,2 W/MK, NIVEAU DE REMPLISSAGE INITIAL = 94 %, TEMPÉRATURE INITIALE DE LA CITERNE = 20 °C, TEMPÉRATURE DU FEU = 816 °C, CAPACITÉ DE LA SOUPAPE DE SÛRETÉ = 35 000 PI^3/MIN) 25

Glossaire

AFFTAC	*Analysis of Fire Effects on Tank Cars*
ASME	American Society of Mechanical Engineers
BLEVE	Détente explosive de vapeurs d'un liquide en ébullition (*Boiling Liquid Expanding Vapour Explosion*)
FRA	Federal Railroad Administration des États-Unis
GPL	Gaz de pétrole liquéfiés
IDA	*Insulation Defect Analyzer*
IR	Infrarouge
PRV	Soupape de sûreté (*Pressure Relief Valve*)

1.0 Introduction

Ce rapport sommaire donne un aperçu des travaux effectués pour déterminer la gravité des défauts de protection thermique que peuvent présenter des wagons-citernes. Le rapport expose les résultats d'une modélisation informatique [1,2], d'essais de rupture par fluage [3] et d'essais au feu [4].

1.1 Contexte

Ce projet a été lancé lorsque Transports Canada était à la recherche d'une méthode fiable pour vérifier l'intégrité de la protection thermique de wagons-citernes. Les systèmes de protection thermique sont conçus pour protéger les wagons-citernes transportant des marchandises dangereuses contre une altération accidentelle par le feu. Ces systèmes doivent en principe protéger la citerne de la rupture pendant 100 minutes lorsqu'elle est enveloppée par un feu d'hydrocarbures, et pendant 30 minutes, lorsqu'elle est soumise à une flamme de chalumeau (p. ex., le rejet en feu de la soupape de sûreté d'une citerne adjacente). Le système de protection thermique étudié ici est formé d'un matelas isolant de fibre céramique haute température de 13 mm d'épaisseur recouvert d'une jaquette en acier de 3 mm.

Les travaux ont commencé par l'élaboration d'une méthode d'inspection sans contact utilisant une caméra à imagerie thermique. Ils ont débouché sur le rapport de Birk et Cunningham [5], qui montre l'utilité de la thermographie infrarouge (IR) pour ce type d'inspection. Ils ont aussi donné lieu à un nombre limité d'inspections de wagons-citernes, lesquelles ont révélé des défauts de protection thermique importants dans certains wagons-citernes. Tout cela a mené à un marché subséquent visant la recherche d'un moyen d'évaluer la gravité des défauts de protection thermique du point de vue de la sécurité. Un deuxième rapport publié par Birk et Cunningham [6] laissait penser que même des défauts de faibles dimensions peuvent être théoriquement dangereux, si le wagon-citerne est exposé à un feu enveloppant.

Pendant ce temps, les travaux de modélisation informatique se sont poursuivis, mais on manquait de données pour valider le modèle. À l'été 2004, des essais au feu ont été menés sur six citernes de propane de 500 gallons conformes au code de l'American Society of Mechanical Engineers (ASME), dans lesquelles des défauts de protection thermique plus ou moins importants avaient été introduits [4]. Les résultats de ces essais, exposés dans le présent rapport sommaire, ont servi à valider les modèles informatiques [1].

1.2 Objectifs et portée

L'objectif de ce projet était d'élaborer un moyen d'évaluer la gravité de défauts de protection thermique. L'analyse s'est limitée aux feux en nappe, laissant de côté le cas des flammes de chalumeau. De plus, ces travaux visaient non pas à calculer la probabilité d'événements, mais plutôt à prévoir les conséquences d'une exposition à un feu intense d'un wagon-citerne présentant des défauts de protection thermique.

1.3 Sommaire

Les défauts de protection thermique n'ont pas à être très étendus pour théoriquement entraîner la rupture d'une citerne exposée à un feu enveloppant. Dans certaines conditions précises qui ont trait au type de contact feu-citerne et à l'emplacement du défaut, un défaut d'environ 1,2 m de longueur (dans l'axe de la citerne) sur environ 0,4 m de largeur pourrait entraîner une petite rupture par fluage dans la paroi d'un wagon-citerne de type 112J. Pour cela, les conditions suivantes doivent être réunies :

i) le défaut est situé au sommet de la citerne ou à proximité;
ii) la zone défectueuse est enveloppée par le feu;
iii) le reste de la protection thermique du wagon-citerne est tel que la chaleur qui pénètre dans la citerne est suffisante pour abaisser le niveau du liquide sous la zone défectueuse.

Le rapport n'a pas cherché à établir la probabilité d'une situation où toutes ces conditions seraient réunies. Il convient de noter que la longueur de 1,2 m se trouve à coïncider, dans la plupart des cas, avec la largeur du rouleau d'isolant utilisé dans les wagons-citernes, et qu'il s'agit donc d'une dimension de défaut courante.

2.0 Wagons-citernes exposés au feu

Lorsqu'un wagon-citerne est exposé au feu, la chaleur du feu pénètre dans le récipient intérieur de la citerne. Là où le récipient intérieur est baigné par le liquide contenu dans la citerne, la chaleur de la paroi est «absorbée» par le liquide. La paroi, dans cette zone, demeure donc à une température voisine de celle du liquide. Mais dans l'espace vapeur, la vapeur ne réussit pas à refroidir la paroi, d'où la montée rapide en température de la paroi. Au-dessus de 400 °C, l'acier commence à faiblir. Au-dessus de 600 °C, il a perdu beaucoup de sa résistance à la température ambiante et avec le temps, d'importants dommages par fluage se manifestent. Même lorsque la soupape de sûreté fonctionne correctement, si la température de la paroi de la citerne atteint environ 620 à 640 °C, celle-ci se rompt au bout de quelques minutes.

Townsend et coll.[7] ont soumis à un feu enveloppant une citerne en vraie grandeur sans aucune protection thermique. La citerne s'est rompue violemment au bout d'environ 24 minutes. Le laboratoire de recherche gouvernemental BAM, en Allemagne, a récemment mené un essai au feu d'une citerne de 45 m^3 remplie de propane à 22 p. 100 de sa capacité. La rupture violente de la citerne a été constatée en 17 minutes [8]. Ces citernes se sont rompues dans des conditions de pression, de contraintes et de température maximale de paroi très semblables. Le matériau constitutif des citernes était lui aussi très similaire dans les deux cas. Ces essais illustrent la rapidité avec laquelle des wagons-citernes sans protection thermique peuvent se rompre lors d'une exposition au feu.

2.1 Protection thermique

La protection thermique sert à ralentir la montée en température de la citerne exposée à un feu. Elle consiste essentiellement en un isolant thermique qui recouvre le wagon-citerne. Cette couche isolante, en ralentissant la montée en température, retarde l'augmentation de la pression dans la citerne, le réchauffement de la paroi et la rupture de la citerne. Les systèmes de protection thermique dont sont actuellement dotés les wagons-citernes de type 112J ont été conçus pour qu'une citerne puisse, en principe, survivre pendant 100 minutes à un feu en nappe plausible (un feu d'hydrocarbures, p. ex.), ou pendant 30 minutes à une flamme de chalumeau.

Les premiers systèmes de protection thermique étaient conçus pour garder la température de la paroi de la citerne sous les 427 °C [9] pendant 100 ou 30 minutes, selon le type de feu. À cette température, la citerne n'est censée présenter aucune défaillance si la soupape de sûreté arrive à garder la pression à l'intérieur de la citerne proche de sa pression d'ouverture.

Le système de protection thermique le plus courant pour les wagons-citernes transportant des gaz de pétrole liquéfiés (GPL) comprend un matelas isolant de fibre céramique haute température de 13 mm d'épaisseur recouvert d'une jaquette en acier de 3 mm. Ce système réduit de 10 fois environ le flux thermique du feu [9]. Le tableau 1 résume

la conductivité thermique en fonction de la température de ce type de matelas en fibre céramique.

Tableau 1 : Sommaire des propriétés isolantes de la fibre céramique (Unifrax, isolant de wagon-citerne, densité de 72 kg/m^3, état neuf [7])

Température (°C)	Conductivité thermique k (W/mK)	Commentaire
-20	0,03	
100	0,05	température de la paroi baignée par le liquide, dans un feu
300	0,09	
500	0,15	température de la paroi de l'espace vapeur avec protection thermique, dans un feu
650	0,20	
800	0,30	température de la jaquette, dans un feu enveloppant

Comme on peut le voir au tableau 1, la conductivité thermique augmente en raison directe de la température. Le feu portera rapidement la jaquette à une température voisine de la température du feu, de sorte que la conductivité thermique de l'isolant adjacent à la jaquette sera d'environ 0,30 W/mK. Quant à l'isolant adjacent à la paroi, il prendra la température de la paroi. Dans les zones baignées par le liquide, cela signifie que l'indice *k* de l'isolant sera d'environ 0,05 W/mK. Ainsi, l'indice *k* moyen est d'environ 0,17 W/mK dans les zones de la paroi refroidies par le liquide. Dans l'espace vapeur, l'indice *k* est plus près de 0,3 W/mK.

L'indice *k* dépend aussi de la densité du matelas isolant. Si l'isolant est écrasé, *k* augmente.

Il convient de noter que la protection thermique ne fait que retarder la rupture. Si le feu devait persister, la citerne finirait par se vider, la température de la paroi se rapprocherait de celle du feu, et la citerne, pour autant qu'elle soit toujours sous pression, pourrait se rompre.

2.2 Défauts de protection thermique

Les défauts de protection thermique peuvent prendre l'une ou l'autre des formes suivantes :

i) vides entre les matelas isolants;
ii) écrasement de l'isolant par la jaquette;
iii) déchirure et tassement du matelas.

Dans de nombreux cas, le défaut se présente comme une zone où il n'y a aucun matelas isolant. En pareil cas, seule une lame d'air sépare la jaquette de la paroi. L'air est un bon isolant et la jaquette joue le rôle de bouclier thermique. Cela réduit de moitié environ le flux thermique du feu [10]. Mais la combinaison air/jaquette est cinq fois plus perméable au flux thermique émis par le feu qu'une bonne protection thermique.

Ainsi, lorsque la jaquette est la seule protection contre le feu, le flux thermique émis par le feu est ralenti, tout comme est retardée la montée en température des parois. Nous avons déjà noté qu'un wagon-citerne de type 112J sans protection aucune arriverait à la rupture au bout d'environ 24 minutes [7]. On peut donc s'attendre à ce qu'une citerne présentant un défaut sur 100 p. 100 de sa surface arriverait à la rupture au bout de 48 minutes environ. Les essais au feu et la modélisation appuient ces chiffres. Cette question est abordée plus loin dans le rapport.

Si le défaut est un contact ferme et direct de la jaquette en acier avec la paroi de la citerne, cette zone est alors sans aucune protection thermique.

2.3 Comportement d'une citerne comportant des défauts de protection thermique

Voici ce qui se produit lorsqu'un wagon-citerne comportant des défauts de protection thermique est exposé à un feu enveloppant (par rapport à un wagon-citerne dont la protection thermique est intacte) :

i) la pression interne augmente plus rapidement (et la soupape de sûreté s'ouvre plus tôt);
ii) le niveau de liquide baisse plus rapidement, augmentant l'espace vapeur;
iii) la température des parois monte plus rapidement;
iv) la température des parois atteint des valeurs plus élevées;
v) la citerne se rompt ou se vide plus tôt.

Les conditions ci-après doivent être réunies pour qu'un wagon-citerne présentant des défauts de protection thermique, mais par ailleurs en bon état, se rompe :

i) le défaut doit exposer une partie importante de l'espace vapeur à un chauffage intense par le feu;
ii) la zone défectueuse doit avoir des dimensions telles que la paroi protégée qui l'entoure n'arrive pas à la refroidir par conduction;
iii) la quantité totale de chaleur qui pénètre dans la citerne doit être suffisante pour abaisser le niveau de liquide jusqu'au point où la zone défectueuse située dans l'espace vapeur atteigne des températures suffisamment élevées pour déclencher la rupture par fluage.

2.4 Défauts admissibles

L'étendue admissible des défauts de protection thermique est une fonction complexe des variables suivantes :

i) conditions du feu
ii) propriétés du matériau constitutif de la paroi de la citerne (rupture par fluage)
iii) caractéristiques de la citerne (diamètre, longueur, épaisseur de la paroi *w*)
iv) performance de la soupape de sûreté (capacité d'écoulement, pression d'ouverture, pression de fermeture après ouverture)
v) état du reste du système de protection thermique (valeur globale de *k*/w [conductance par unité de surface], y compris les liens de conduction directe dans la structure de la citerne)
vi) conditions initiales (niveau de remplissage et température)

Tous les wagons-citernes présentent des défauts mineurs de leur système de protection thermique. Il est très difficile de produire un système parfait – il peut y avoir des vides entre les matelas, ou encore la mise en place de la jaquette en acier peut avoir entraîné le glissement, l'écrasement et/ou la déchirure des matelas. Ces lacunes peuvent représenter moins de 1 p. 100 de la surface du wagon-citerne. De petites zones défectueuses sont sans véritable importance car elles sont entourées de zones bien protégées qui les empêcheront de devenir très chaudes dans un feu.

Mais si les défauts gagnent du terrain, ou s'il y en a beaucoup, la sécurité du wagon-citerne sera compromise en cas d'exposition à un feu intense. La question alors est : quelles dimensions les défauts peuvent-ils atteindre avant de poser un véritable problème?

2.5 Soupapes de sûreté

Les soupapes de sûreté sont dimensionnées de façon à empêcher les surpressions à l'intérieur du wagon-citerne dans l'éventualité où il serait exposé à un feu enveloppant. Le diamètre qu'il faut prévoir pour la soupape dépend de la vitesse de montée en température du chargement sous l'effet du feu. Si un wagon est pourvu d'une protection thermique, il est théoriquement possible de réduire le diamètre de la soupape. Ces dernières années, l'effet de la protection thermique a été pris en compte dans le dimensionnement des soupapes de sûreté; c'est ainsi que le diamètre admissible de la soupape d'un wagon-citerne avec protection thermique a diminué. Par exemple, pour un wagon-citerne de type 112J pourvu d'un isolant thermique en fibre céramique haute température de 13 mm d'épaisseur, la capacité d'écoulement de la soupape de sûreté peut être environ dix fois moindre que dans le cas d'un wagon-citerne non protégé. Cela signifie que le débit nominal peut être réduit d'environ 16 à 1,6 m^3/s (35 000 à 3 500 pi^3/min) pour un wagon-citerne de type 112J.

Si un wagon-citerne est équipé d'une soupape de sûreté offrant un débit de 3 500 pi^3/min, la question des défauts de protection thermique est alors encore plus cruciale. Car si une soupape de sûreté est dimensionnée en fonction d'un wagon-citerne avec protection thermique, elle risque d'être sous-dimensionnée pour un wagon-citerne qui présenterait des défauts importants.

Ce rapport a porté sur des wagons-citernes de type 112J équipés de soupapes de sûreté d'une capacité de 35 000 pi^3/min. Il suppose donc que la rupture de la citerne est causée par une température excessive de la paroi, et non par une pression excessive. Car, muni d'une soupape de sûreté ainsi dimensionnée, un wagon-citerne dont la protection thermique serait défectueuse sur 100 p. 100 de sa surface (c.-à-d. dont la protection se limiterait à une jaquette en acier et une lame d'air entre la jaquette et la paroi) ne connaîtrait jamais de pression interne supérieure à environ 110 p. 100 de la pression d'ouverture de la soupape.

Des soupapes de sûreté débitant 3 500 pi^3/min installées sur des wagons-citernes présentant des défauts de protection thermique ont été l'objet d'une analyse préliminaire qui donne à penser qu'aucun défaut de protection thermique ne devrait être admis dans les wagons-citernes équipés de ces soupapes. Une analyse approfondie s'impose.

2.6 Modélisation thermique

Comme on l'a déjà vu à la section 2.4, l'étendue admissible des défauts de protection thermique est une fonction complexe de plusieurs paramètres : conditions du feu, propriétés du matériau constitutif de la citerne, caractéristiques de la citerne, performance de la soupape de sûreté, état du reste du système de protection thermique, conditions initiales.

Pour pouvoir prendre en compte tous ces paramètres, nous avons élaboré un modèle informatique d'un wagon-citerne présentant des défauts de protection thermique, appelé IDA 2.1 (pour *Insulation Defect Analyzer*). Partout dans le monde, il existe des modèles thermiques de wagons-citernes, dont plusieurs sont très bons [11,12]. Mais tous ont leurs limites. Aucun ne peut être qualifié de parfait et achevé.

L'AFFTAC (pour *Analysis of Fire Effects on Tank Cars)* [13] est un exemple de modèle thermique utilisé par Transports Canada et la Federal Railroad Administration (FRA) des États-Unis pour modéliser des wagons-citernes exposés à des feux. Birk a récemment fait un examen critique de ce code [14], afin d'évaluer sa pertinence en tant qu'outil de modélisation de défauts de protection thermique. Il a conclu que le modèle comportait plusieurs lacunes à cet égard. C'est pourquoi un nouveau code a été élaboré, fortement inspiré des méthodes utilisées par l'AFFTAC et d'autres codes reconnus.

Le code IDA 2.1 a été élaboré expressément pour l'analyse des défauts de protection thermique. Il a récemment été validé par les résultats d'essais au feu menés sur des citernes à échelle réduite dont la protection thermique avait été endommagée [4].

L'IDA 2.1 est un code pseudo-tridimensionnel qui permet de représenter des défauts partout sur la citerne. La figure 1 représente une citerne avec des défauts simulés, modélisée par l'IDA 2.1.

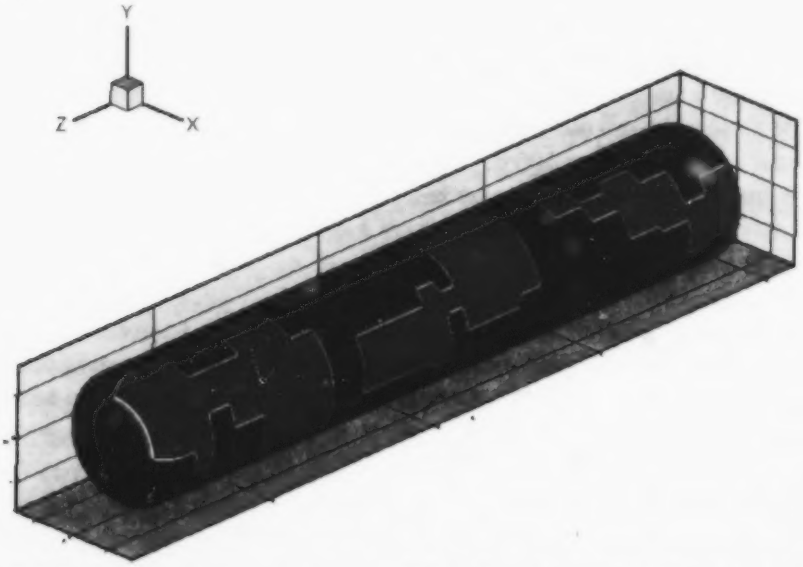


Figure 1 : Schéma d'une citerne de type 112J présentant des défauts de protection thermique (en rouge)

Ce code prend en compte les principaux phénomènes auxquels on assiste lorsqu'une citerne est exposée à un feu, à savoir :

i) transfert de chaleur du feu à la citerne
ii) phénomènes de conduction, convection et rayonnement qui font augmenter la température de la paroi
iii) montée en température du chargement à la faveur d'un processus thermodynamique
iv) ouverture de la soupape de sûreté
v) mise sous contrainte de la citerne
vi) rupture de la paroi de la citerne (rupture par fluage à haute température)

Les facteurs déterminants de la rupture du wagon-citerne sont la température de la paroi dans l'espace vapeur, les propriétés haute température du matériau constitutif de la paroi et la pression interne de la citerne. Les critères de rupture de la citerne et les propriétés du matériau constitutif de la paroi du wagon-citerne sont des données absolument essentielles pour prévoir des temps jusqu'à la rupture raisonnables.

2.7 Rupture par fluage

Un élément crucial du modèle thermique est l'analyse de la rupture.

Lorsqu'un wagon-citerne exposé au feu se rompt, cette rupture peut avoir été déclenchée par une fissure importante ou il peut s'agir d'une rupture par fluage à haute température. La fissure peut être due à la corrosion, à la fatigue du métal ou à un défaut de soudure. Cette étude n'a pas pris en compte la présence de fissures importantes dans la citerne, pour se concentrer plutôt sur les cas de rupture ductile à haute température.

L'acier porté à des températures supérieures à 400 °C commence à perdre sa résistance à la traction. Plus la température monte, plus l'acier faiblit. La figure 2 montre les propriétés de rupture par fluage à haute température du nouvel acier pour wagons-citernes TC 128B. Ces données découlent d'essais récents menés dans le cadre du présent projet [3]. Ces essais de rupture par fluage à haute température ont été réalisés sur des éprouvettes d'acier prélevées sur des citernes impliquées dans un déraillement récent survenu en Ontario, au Canada. La figure 2 montre certains des résultats de ce programme d'essais. Ces nouvelles données sont beaucoup plus détaillées que les données antérieures touchant le TC 128B, issues de l'étude [15].

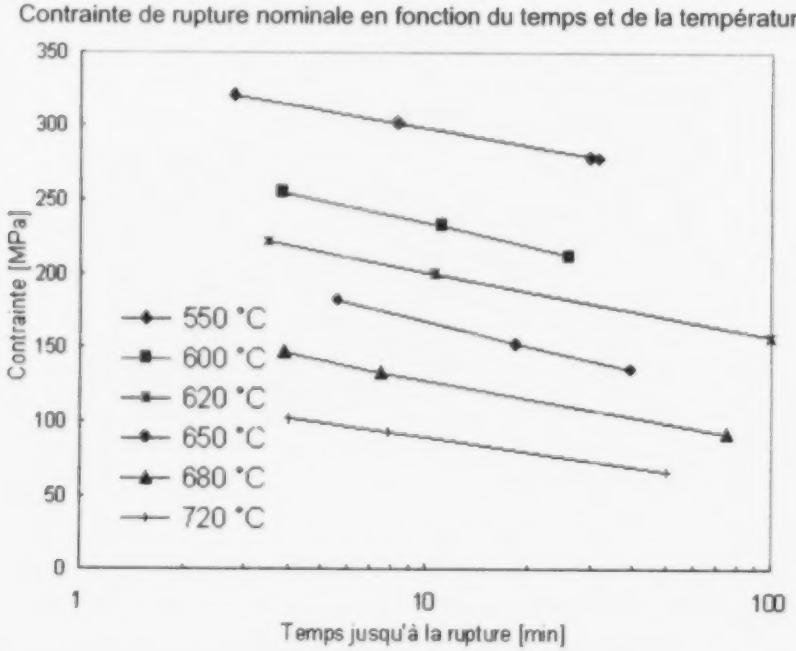


Figure 2 : Données de rupture par fluage pour l'acier TC 128B [3]

Les données de la figure 2 sont fondées sur des essais de traction dans un seul axe, mais on sait par expérience qu'elles peuvent servir à prédire la rupture d'un wagon-citerne si la contrainte périphérique de la paroi et la température sont connues. Par exemple, dans un wagon-citerne de type 112J (diamètre de 3 m, paroi de 16 mm d'épaisseur, pression interne de 2 MPa), la contrainte périphérique est d'environ 190 MPa. La figure 2 indique

que l'acier se romprait au bout d'environ trois minutes à 650 °C et d'environ 30 minutes à 620 °C.

Ces données ont été utilisées dans la présente étude pour déterminer les temps jusqu'à la rupture des citernes.

2.8 Essais au feu

Les modèles informatiques doivent être validés par des données expérimentales. Dans le cas des wagons-citernes comportant des défauts de protection thermique, il faut mener des essais au feu pour obtenir ces données. Ces essais génèrent des données concernant des propriétés critiques des citernes et de leur chargement, comme :

i) augmentation de la pression dans la citerne
ii) ouverture de la soupape de sûreté
iii) température de la paroi dans l'espace liquide et dans l'espace vapeur
iv) temps jusqu'à l'expulsion complète du chargement ou jusqu'à la rupture
v) étendue de la rupture

Sont comprises dans le présent rapport les données découlant des essais des citernes de 500 gallons utilisées pour simuler des wagons-citernes en vraie grandeur comportant des défauts de protection thermique. Le diamètre de ces citernes équivaut environ au tiers de celui d'un wagon-citerne, et leur longueur, au sixième.

3.0 Essais au feu de citernes de propane de 500 gallons

Les essais ont été réalisés au cours de l'été 2004 [4] à l'aide de citernes de propane de 500 gallons conformes au code ASME. Des défauts avaient été introduits dans les citernes, après quoi elles avaient été exposées à un enveloppement partiel par le feu. Les figures 3 et 4 montrent les citernes pendant les essais au feu. Ces essais devaient permettre d'approfondir la relation entre les dimensions des défauts et les dimensions de la rupture.

Figure 3 : Citerne d'essai partiellement recouverte d'une jaquette en acier (le défaut est situé sous la jaquette, du côté non visible de la citerne) [4]

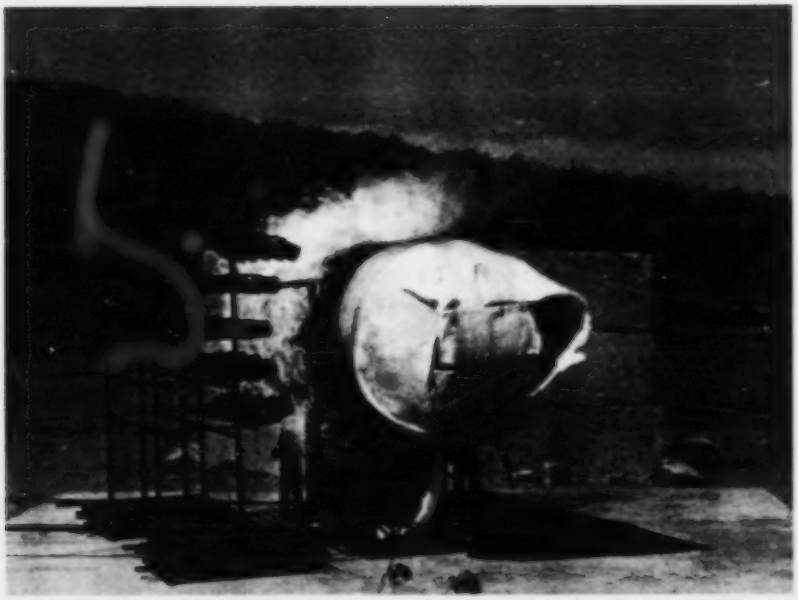


Figure 4 : Citerne d'essai de 500 gallons conforme au code de l'ASME plongée à 25 % dans les flammes (température de corps noir du feu : 800 à 900 °C) [4]

Les citernes étaient plongées à 25 p. 100 dans le feu. La température de corps noir du feu se situait entre 800 et 900° C, ce qui est plausible pour des feux en nappe d'hydrocarbures. Trois cas de figure sont présentés ici – un essai sur une citerne dite de référence, sans aucune protection (aucun isolant ni jaquette), puis sur deux citernes comportant des défauts sur 15 p. 100 (défaut important) et sur 8 p. 100, respectivement, de leur surface. Les citernes étaient protégées par un isolant neuf pour wagon-citerne (matelas en céramique de 13 mm d'épaisseur), lequel était recouvert à son tour d'une jaquette en acier de 3 mm, dans la zone exposée au feu.

Les figures 5 et 6 donnent les résultats des essais au feu des citernes de 500 gallons comportant des défauts simulés de protection thermique [4].

La figure 5 montre l'influence de la protection thermique sur la vitesse de montée en pression de la citerne. La citerne présentant la meilleure protection thermique (défaut sur 8 p. 100 de la surface) est celle dans laquelle la montée en pression a été la plus lente. La figure 6 illustre la montée en température de la paroi, dans les zones défectueuses. Il est à noter que la rupture de la citerne s'est produite là où la courbe finit. Aucune des citernes dans lesquelles des défauts avaient été introduits n'a subi de rupture catastrophique : leur rupture a plutôt pris la forme de fissures longitudinales de différentes longueurs. Au défaut de plus faibles dimensions était associée la fissure la moins longue.

Comme on peut le voir, les citernes avec défauts atteignent les mêmes températures maximales de paroi que les citernes sans protection, mais cela prend plus de temps. Il convient de noter que la température des parois subissait l'effet indirect du vent agissant sur le feu. Ainsi, une baisse soudaine de la température de la paroi était associée à une diminution de la chaleur du feu attribuable au vent. On doit extrapoler la courbe pour

obtenir le temps jusqu'à la rupture, compte non tenu des effets du vent. On peut constater que la rupture des citernes est toujours survenue lorsque la température de la paroi dépassait quelque 710 °C. La défaillance de la citerne qui présentait le plus petit défaut est survenue à 59 minutes. Mais si le vent n'avait pas atténué l'effet du feu, il est très probable que la rupture serait survenue à environ 36 minutes.

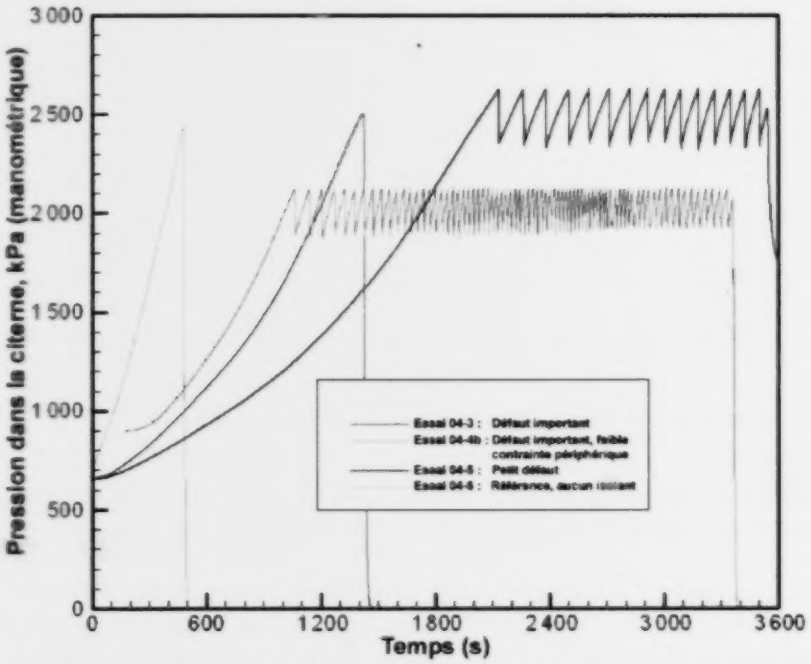
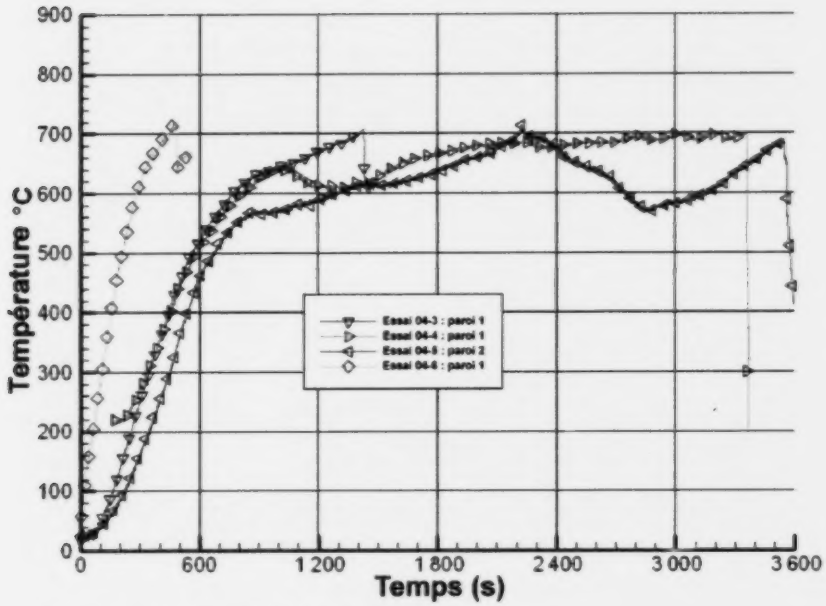


Figure 5 : Mise en pression de la citerne en fonction du temps (citerne de 500 gallons conforme au code de l'ASME présentant divers niveaux de protection thermique, plongée à 25 % dans le feu) [4]



Température de la paroi en fonction du temps

Figure 6 : Température maximale de la paroi sous le défaut en fonction du temps (citerne de 500 gallons conforme au code de l'ASME présentant divers niveaux de protection thermique, plongée à 25 % dans le feu) [4]

Les données de la figure 6 montrent qu'avec des défauts de protection thermique, les parois peuvent effectivement atteindre des températures dangereuses et qu'une rupture de la citerne surviendra à coup sûr si le défaut est suffisamment important et le feu, suffisamment intense.

3.1 Dimension critique du défaut

La modélisation du transfert thermique [6] et les essais au feu [16] ont indiqué que la dimension critique du défaut, du point de vue du transfert thermique, pour une plaque de 16 mm d'épaisseur, est d'environ 0,4 m sur 0,4 m. À de telles dimensions, le centre de la zone défectueuse n'arrive pas vraiment à être refroidi par le métal protégé, donc plus froid, situé en périphérie. Autrement dit, la température au centre de la plaque augmentera comme s'il n'y avait pas de matériau protégé autour. Cela est illustré à la figure 7, tirée de la référence [16].

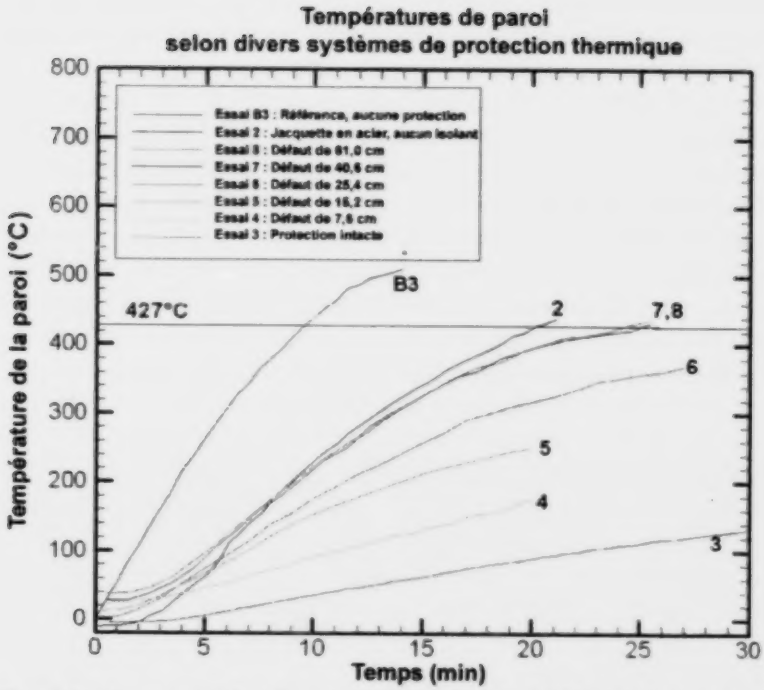


Figure 7 : Températures maximales mesurées sous les défauts de protection thermique (plaque de 16 mm) dans un feu enveloppant (température effective de corps noir = 840 °C) [16]

Comme la montre la figure 7, un défaut de 0,4 m sur 0,4 m (essai 7) donne à peu près la même courbe qu'un défaut de 100 p. 100 (essai 2).

Pour qu'un défaut mène à une rupture par fluage, ses dimensions doivent dépasser celles indiquées à la figure 7, de façon que suffisamment de matériau soit porté à haute température pour que soit déclenchée une rupture par fluage. Ce paramètre est difficile à prévoir sans une connaissance approfondie des propriétés du matériau et une modélisation détaillée (p. ex., analyse tridimensionnelle du fluage et des déformations élastiques-plastiques par la méthode des éléments finis). C'est pourquoi des essais au feu ont été réalisés.

Les défauts de protection thermique étaient situés sous le centre de la zone recouverte de la jaquette montrée aux figures 3 et 4. Cette zone a alors été soumise à un feu d'hydrocarbures dont la température de corps noir effective était d'environ 800 à 900 °C. Il convient de noter que ces essais étaient conçus pour reproduire des conditions semblables à celles qui caractérisent un wagon-citerne, à savoir :

i) réaction semblable au flux thermique émis par le feu
ii) contraintes semblables
iii) propriétés semblables du matériau

On s'attendait à ce que la rupture survienne trois fois plus vite dans les citernes de 500 gallons que dans les citernes en vraie grandeur. On trouvera dans le rapport [4] les motifs à la base de cette supposition.

La longueur de la rupture dépendait de la longueur (dans l'axe de la citerne) du défaut de protection thermique. La figure 8 montre le rapport entre ces deux données. Si on fait une extrapolation linéaire de ces données jusqu'à la longueur de rupture zéro (trou d'épingle), la longueur de défaut de protection thermique résultante est alors d'environ 0,55 m pour la citerne de 500 gallons. Ces données valent pour une paroi de 7,1 mm d'épaisseur. Toutes proportions gardées, dans le cas d'un wagon-citerne de type 112J dont la paroi a 16 mm d'épaisseur, le défaut doit avoir 1,2 m de longueur.

Donc, en théorie, un défaut de seulement 1,2 m de longueur (dans l'axe de la citerne) sur 0,4 m de largeur, environ, suffirait à causer une petite fissure dans un wagon citerne de type 112J. Or, il s'avère que les matelas servant habituellement de matériau isolant mesurent 1,2 m de largeur. Il est peu probable qu'une telle fissure entraîne une rupture catastrophique de la citerne – mais elle le pourrait. Cette petite fissure jouerait probablement le rôle d'une soupape de sûreté additionnelle. Toutefois, les petites fissures peuvent se propager et mener, dans certaines conditions, à une ouverture complète de la citerne. Comme il est difficile d'établir avec certitude ces conditions, toute fissure doit être considérée inacceptable.

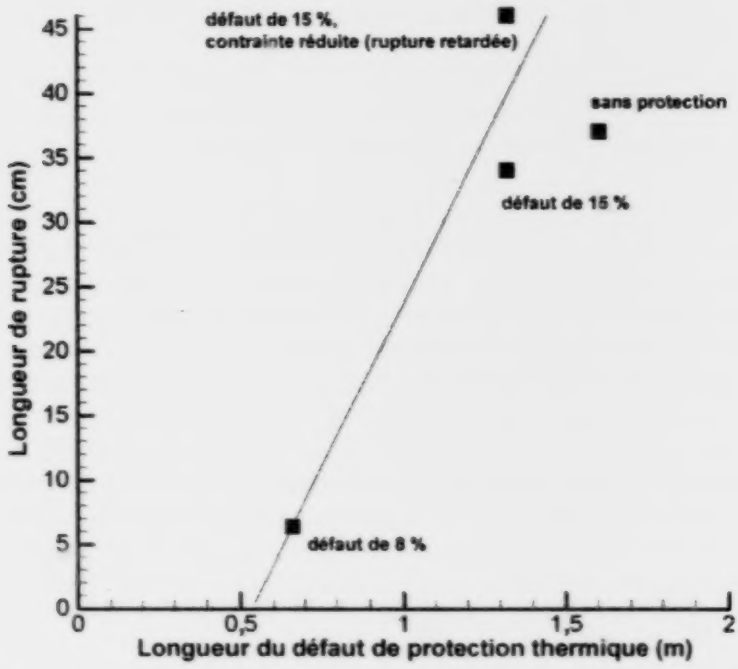


Figure 8 : Longueur de la fissure en fonction de la longueur du défaut de protection thermique (citerne de 500 gallons, diamètre = 0,96 m, épaisseur de paroi = 7,1 mm, acier SA 455, longueur de la zone chauffée par le feu = environ 1,6 m, données tirées de la référence [4])

La figure 9 est une photo d'une citerne de 500 gallons comportant un défaut de protection thermique, après rupture. Le défaut mesurait environ 1,3 m dans l'axe de la citerne, ce qui correspondrait à un défaut d'environ 3 m dans un wagon-citerne 112J. Ainsi, toutes proportions gardées, ce défaut, s'il se manifestait dans un wagon-citerne, entraînerait une fissure d'environ 0,8 m.

La longueur de fissure critique, soit celle susceptible d'entraîner la rupture catastrophique d'un wagon-citerne, est déterminée d'après le paramètre de «bombement» de Folias (voir Birk et coll. [17]). En tenant compte de ce paramètre, la longueur de fissure critique, qui entraînera à coup sûr une ouverture complète de la citerne (BLEVE ou détente explosive de vapeurs d'un liquide en ébullition) serait d'environ 2,2 à 3 m. Cette dimension correspondrait à un défaut de protection thermique d'environ 3 à 3,8 m dans le cas d'un wagon-citerne 112J.

Figure 9 : Citerne comportant des défauts de protection thermique sur 15 % de sa surface, après rupture [4]

Le tableau 2 présente un sommaire des résultats d'essais menés avec la citerne de 500 gallons, ainsi que les données correspondantes pour un wagon-citerne de type 112J.

Tableau 2 : Sommaire des défaillances observées dans une citerne de 500 gallons et données extrapolées pour un wagon-citerne de type 112J

Résultats	Citerne de 500 gallons (utilisée pour les essais) paroi de 7,1 mm		Wagon-citerne de type 112J paroi de 16 mm (transposition des résultats d'essai de la citerne de 500 gallons, d'après l'épaisseur de la paroi)	
	petit défaut L = 0,65 m[1] 8 % de la surface de la citerne	défaut important L = 1,3 m 15 % de la surface	petit défaut L = 1,5 m 4 % de la surface	défaut important L = 3 m 8 % de la surface
Temps jusqu'à la rupture	36 min (estimation)[2]	24 min	108 min	72 min
Longueur de la fissure	6 cm	34 cm	14 cm	77 cm

[1] *L = longueur du défaut dans l'axe de la citerne*

[2] *Dans le cas de la citerne de 500 gallons comportant un défaut sur 8 % de sa surface, la rupture est survenue en réalité au bout de 59 minutes, mais cela comprend environ 23 minutes de faible exposition au feu. On estime que la durée de 36 minutes représente un temps jusqu'à la rupture plus réaliste.*

3.2 Transposition des résultats d'essais

Peut-on utiliser les résultats d'un essai au feu mené sur une citerne de 500 gallons pour prévoir le comportement d'un wagon-citerne de 33 000 gallons exposé au feu? Oui – mais avec prudence. On ne peut pas transposer directement les résultats car les citernes diffèrent par leurs dimensions, l'épaisseur de leur paroi, les propriétés de leur matériau constitutif, leur niveau de remplissage, etc. Toute transposition doit se faire dans le respect de certaines lois de la physique.

Il est en effet très important de transposer correctement les résultats. C'est pourquoi nous avons élaboré des modèles informatiques détaillés des divers processus physiques en jeu. Ainsi, nous ne procédons pas à une simple augmentation d'échelle des résultats obtenus, mais nous utilisons ceux-ci pour valider un modèle détaillé. Pour autant que le modèle respecte les lois de la physique (c.-à-d. la conservation de la masse, la conservation de l'énergie, les propriétés thermodynamiques du chargement, etc.), nous devrions être capables de prévoir le comportement d'une citerne en vraie grandeur à partir d'essais d'une citerne à échelle réduite.

Les essais au feu de citernes remontent au début des années 1970 (voir, p. ex., [7, 8, 9, 18-21]). De nombreux essais à petite échelle ont été menés, les dimensions des récipients allant de quelques litres à des milliers de litres. Peu d'essais en vraie grandeur ont eu lieu, mais assez pour montrer que les mêmes processus sont observés dans les deux types

d'essais. Nous croyons donc que les résultats obtenus avec les citernes de 500 gallons peuvent être transposés à des citernes en vraie grandeur. Pour un exposé détaillé du processus d'augmentation d'échelle, on se reportera aux références [4], [22] et [23].

Il sera toutefois probablement nécessaire, un jour, de mener des essais en vraie grandeur pour démontrer avec certitude les effets de l'augmentation d'échelle.

4.0 Résultats de la modélisation thermique

Les citernes de 500 gallons utilisées pour les essais au feu ne constituent pas des modèles parfaits du wagon-citerne de type 112J. Par exemple, les niveaux de remplissage initial n'étaient pas les mêmes. Les citernes de 500 gallons étaient remplies à environ 70 - 80 p. 100, tandis qu'il est possible de remplir davantage les wagons-citernes. Or, nous savons que le niveau de liquide est important, car le refroidissement de l'espace vapeur en dépend. D'où la nécessité d'une correction qui tienne compte de cette différence dans les niveaux de remplissage.

Pour corriger pour cet écart, nous avons besoin d'un modèle thermique détaillé d'un wagon-citerne dans un feu, comme le code IDA 2.1. Pour de plus amples détails sur ce modèle, on se reportera à [1].

4.1 Validation

Le modèle IDA 2.1 a été validé par les résultats d'un essai au feu d'une citerne en vraie grandeur ne comportant aucune protection [7] et ceux d'essais au feu de citernes de 500 gallons. Le tableau 3 présente un résumé de cette validation.

Tableau 3 : Sommaire des résultats de la modélisation thermique

Résultats	RAX 201 (wagon-citerne 112J en vraie grandeur)		Citerne de 500 gallons sans protection thermique		Citerne de 500 gallons, défaut sur 15 % de sa surface		Citerne de 500 gallons, défaut sur 8 % de sa surface	
	essai	modèle	essai	modèle	essai	modèle	essai	modèle
Première ouverture de la soupape de sûreté (min)	2	2	8-9	6	25	21	35	31
Temps jusqu'à la rupture (min)	24	20	8	7	24	21	36	31
Niveau de remplissage à la rupture (%)	50	55	75	75	71	70	74	72
Température maximale de la paroi à la rupture (°C)	640	645	720	730	720	730	690	710

Comme le montre le tableau 3, le programme IDA 2.1 devance de quelques minutes la première ouverture de la soupape de sûreté et la rupture, par rapport aux données d'essai.

Cela peut s'expliquer en partie par le fait que le feu prend un certain temps pour atteindre sa pleine intensité (ce qui n'est pas pris en compte dans le modèle IDA 2.1). Le tableau 3 témoigne néanmoins d'une bonne correspondance des données, dans plusieurs cas. Le modèle se montre quelque peu «prudent» dans la prévision du temps jusqu'à la rupture.

4.2 Simulations de wagons-citernes

Nous utilisons maintenant le modèle IDA 2.1 pour simuler un wagon-citerne de type 112J comportant des défauts de protection thermique.

La prévision de la rupture du wagon-citerne est fondée sur les données les plus récentes concernant la rupture par fluage à haute température de l'acier TC 128B neuf. Le tableau 4 résume les hypothèses posées pour les passages du modèle.

Tableau 4 : Sommaire des principales variables

	Hypothèse	Commentaire
Feu	816 °C Température de corps noir Pas de convection Enveloppant à 100 % au temps = 0	Cas du feu minimal – conditions réelles : 871 °C, plus ou moins 56 degrés (donc hypothèse de température du feu qui manque de prudence)
Propriétés du matériau	Acier TC 128 B Résistance à la traction de 620 MPa Selon les essais de Birk et Yoon [3]	Minimum de 550 MPa pour l'acier TC 128B (donc hypothèse de propriétés du matériau qui manque de prudence)
Caractéristiques de la citerne	D = 3 m, L = 18 m Épaisseur de paroi = 16 mm	
Soupape de sûreté	35 000 ou 3 500 pi^3/min à 110 % de la pression d'ouverture Pression d'ouverture = 1,93 MPa (280,5 lb/po^2 manométrique) Ouverture théorique à 110 % de la pression d'ouverture, refermeture à 100 %	
k/w pour le reste du système de protection thermique	w = 13 mm Valeur moyenne de k = 0,15, 0,175, 0,20, 0,3 W/mK	Céramique haute température. L'indice k maximal acceptable pour un essai standard sur plaque est de 0,295 W/mK [13]
Conditions initiales	T = 20 °C Remplissage = 94 %	

La seule variable que l'on ne connaît pas avec un niveau raisonnable de certitude est la conductance effective globale par unité de surface, k/w (où k = conductivité thermique,

W/mK et w = épaisseur de la paroi en mètres). Or, il s'agit d'une variable très importante, car elle peut déterminer la vitesse avec laquelle le niveau de liquide baisse, exposant ainsi les défauts situés dans la partie supérieure de la citerne. Si le rapport *k*/w est très bon (c.-à-d. faible), c'est la superficie totale des défauts qui commande la vitesse de l'écoulement du chargement par la soupape de sûreté. Si le rapport *k*/w n'est pas très bon (c.-à-d. élevé), c'est la conductance qui détermine à quelle vitesse le niveau de liquide baissera et il suffit dans ce cas d'un seul défaut critique situé dans le haut de la citerne pour que survienne une rupture.

Les simulations ont porté sur les cas de figure suivants :

i) isolant de 13 mm présentant une gamme de valeurs de conductivité thermique *k* (W/mK)
ii) un seul défaut important * (1 p. 100 de la surface de la citerne) dans l'espace vapeur
iii) de nombreux défauts, y compris un défaut critique (1,2 m sur 0,4 m) dans l'espace vapeur

Les tableaux 5 et 6 résument les résultats.

** Un défaut important est défini comme un défaut dont les dimensions dépassent celles d'un défaut critique (1,2 m dans l'axe de la citerne sur 0,4 m de largeur).*

Tableau 5 : Paramètres d'une citerne comportant un seul défaut important (wagon-citerne de type 112J, contenant du propane, défaut situé dans la partie supérieure, 2 m de longueur dans l'axe de la citerne sur 0,75 m de largeur, représentant environ 1 % de la surface de la citerne, niveau de remplissage de 94 %, température initiale de la citerne = 20 °C, température du feu = 816 °C, capacité de la soupape de sûreté = 35 000 pi^3/min)

Conductivité de l'isolant	Pression à 100 min	Niveau de remplissage à la rupture ou à 100 min	Temps jusqu'à la rupture	Commentaire
k = 0,3 W/mK	2 MPa ouverture et fermeture de la soupape de sûreté	0,50	82 min	Valeur maximale de k selon la norme des essais sur plaque
k = 0,2	2 MPa ouverture et fermeture de la soupape de sûreté	0,96	pas de rupture au bout de 100 min	peut représenter un système «comme neuf»
k = 0,1 ou moins	1,5 MPa écoulement du liquide par la soupape lorsque le récipient intérieur est plein	récipient plein à plus de 99 %	aucune rupture au bout de 100 min	probablement non représentatif des systèmes réels

Le tableau 5 révèle que la rupture de la citerne est fortement tributaire de l'état du reste de la protection thermique. Ainsi, si le reste de la citerne est bien protégé, la citerne devrait survivre à la présence d'un seul défaut important dans l'espace vapeur. Mais si le reste de l'isolation laisse à désirer, l'abaissement du niveau de liquide entraînera la formation d'un espace vapeur important, ce qui fera monter la température dans la zone du défaut et pourrait provoquer la rupture de la citerne.

Le tableau 6 donne l'étendue admissible des défauts dans le cas où le reste de la citerne est protégé thermiquement par un isolant dont l'indice k s'établit en moyenne à 0,2 W/mK.

Tableau 6 : Paramètres d'une citerne comportant de nombreux défauts, dont au moins un défaut important au sommet de l'espace vapeur (wagon-citerne de type 112J, contenant du propane, isolant de 13 mm, conductivité théorique de l'isolant, k = 0,2 W/mK, niveau de remplissage initial = 94 %, température initiale de la citerne = 20 °C, température du feu = 816 °C, capacité de la soupape de sûreté = 35 000 pi^3/min)

% de surface défectueuse	Pression à 100 min	Niveau de remplissage à la rupture ou à 100 min	Temps jusqu'à la rupture	Commentaire
1 %	1,5 MPa écoulement du liquide par la soupape lorsque le récipient intérieur est plein	> 99 %	> 100 min pas de rupture	résiste
2 %	2 MPa ouverture et fermeture de la soupape de sûreté	> 99 %	> 100 min pas de rupture	résiste
4 %	2 MPa ouverture et fermeture de la soupape de sûreté	79 %	96 min	limite du défaut admissible?
8 %	2 MPa ouverture et fermeture de la soupape de sûreté	79 %	89 min	rupture
12 %	2 MPa ouverture et fermeture de la soupape de sûreté	75 %	85 min	rupture

Comme le montre le tableau 6, des défauts d'isolation ne couvrant que 4 % de la surface suffisent à provoquer la rupture de la citerne en moins de 100 minutes lorsque k = 0,2 W/mK. Mais pour cela, il faut qu'au moins un défaut important soit situé près de la partie supérieure de la citerne.

Une série de simulations ont été réalisées pour diverses superficies de zones défectueuses et valeurs k. Celles-ci sont résumées à la figure 10. Comme on peut le voir, les dimensions admissibles des défauts dépendent fortement de la conductance effective de l'ensemble du système de protection thermique. Les données concernant le parc actuel de wagons-citernes ne nous renseignent pas de façon satisfaisante sur ces paramètres. Des essais seront nécessaires pour établir ces valeurs.

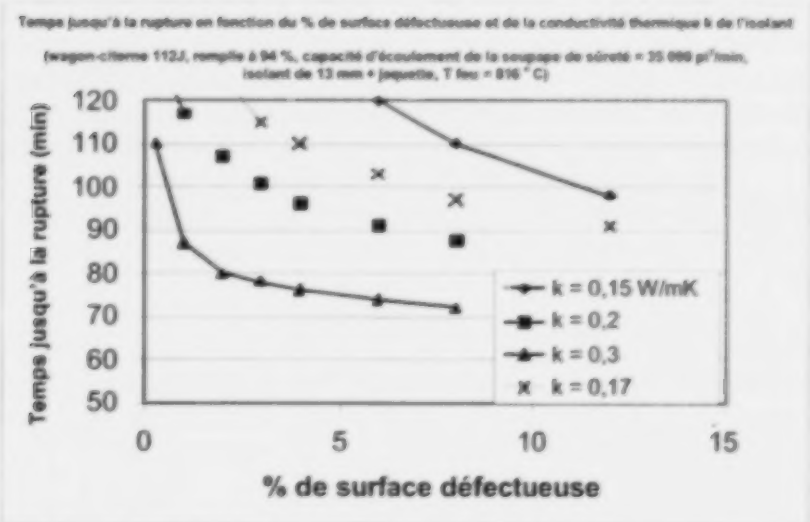


Figure 10 : Temps jusqu'à la rupture prévu en fonction du pourcentage de surface défectueuse et de la conductivité thermique effective globale du système de protection thermique (en supposant un matelas céramique de 13 mm)

5.0 Discussion

Les sections ci-après abordent la question sous d'autres angles complémentaires.

5.1 IDA 2.1 et AFFTAC

L'IDA 2.1 donne des résultats différents de ceux obtenus avec l'AFFTAC. Les résultats du modèle IDA 2.1 sont prudents mais raisonnables, si on les compare avec les données des essais au feu.

Voici les principaux points par lesquels l'IDA 2.1 se différencie de l'AFFTAC :

i) L'IDA 2.1 est un modèle partiellement tridimensionnel; il peut donc modéliser des défauts de protection thermique n'importe où sur la citerne.
ii) Le code IDA prévoit une montée en pression accélérée de la citerne en raison des gradients de température du liquide (la température est plus élevée près des parois et à la surface du liquide).
iii) La soupape de sûreté s'ouvre et se ferme et la pression (et la contrainte) à l'intérieur de la citerne augmente et diminue, comme elle le ferait dans la réalité en oscillant entre les pressions d'ouverture et de fermeture après ouverture.
iv) L'espace vapeur se réchauffe plus rapidement à mesure que le niveau de liquide s'abaisse parce que les paramètres de convection et de rayonnement dans l'espace vapeur sont plus prudents.
v) Le récipient intérieur est moins susceptible de se remplir complètement lors d'un incendie parce que la soupape de sûreté s'ouvre plus tôt en raison de la pression de saturation (voir le point ii) et parce que la soupape de sûreté entraîne le liquide lorsqu'il s'approche de l'entrée de la soupape.
vi) La prévision de la rupture se fait à l'aide des données de rupture par fluage à haute température.

Toutes ces particularités s'additionnent pour donner un code qui aboutit à des prévisions plus réalistes du temps jusqu'à la rupture.

5.2 Validation du code IDA 2.1

Les résultats générés par le code IDA 2.1 semblent raisonnables lorsqu'on les compare à ceux obtenus par des méthodes bien établies, comme l'essai au feu RAX 201 d'un wagon-citerne sans aucune protection thermique [7]. Nous avons aussi une validation fondée sur l'essai au feu d'une citerne de 500 gallons comportant des défauts de protection thermique simulés. Cela donne à penser que le code est capable de prévoir les performances d'une citerne dans une gamme réaliste d'échelles et de dimensions de défauts.

Dans tous les cas, le code IDA 2.1 a devancé de quelques minutes le moment de la rupture, par rapport aux résultats des essais. La plupart du temps, le code IDA surestime la vitesse de montée en température des parois par rapport à ce qui est observé au cours des essais et c'est pourquoi il devance le moment de la rupture. Cet écart de la température des parois tient vraisemblablement au temps que met le feu à atteindre sa pleine intensité, lors des essais. On sait aussi, d'après les essais au feu [24], que de gros objets frais exposés au feu refroidissent le feu et réduisent le flux thermique. À mesure que le gros objet se réchauffe, l'effet de refroidissement s'atténue et le feu devient plus chaud. Or, ce phénomène n'est pas pris en compte par le code IDA 2.1.

Tout compte fait, nous estimons raisonnables et prudentes les prévisions faites par l'IDA.

5.3 Emplacement du défaut

En l'absence de défaut important près du sommet de la citerne (c.-à-d. dans l'espace vapeur), la rupture ne surviendra que lorsque le niveau de liquide atteindra la zone du défaut. Nous devons tenir compte du fait qu'une citerne peut se renverser sur le côté lors d'un accident, et des défauts latéraux peuvent alors se situer au sommet de la citerne.

Il convient également de noter qu'une citerne renversée sur le côté se videra plus rapidement par la soupape de sûreté, car la soupape sera alors immergée dans le liquide. Cela signifie que le niveau de liquide baissera plus rapidement, augmentant ainsi l'espace vapeur. Les citernes renversées n'ont pas été prises en considération au cours des présents travaux.

5.4 Capacité de la soupape de sûreté

Les cas modélisés comportaient tous des soupapes de sûreté en vraie grandeur dont la capacité d'écoulement se situait autour de 35 000 pi^3/min. Comme on l'a fait observer à la section 2.5, les défauts sont plus critiques lorsque la soupape a une capacité d'écoulement moindre (3 500 pi^3/min, comme celles permises pour les citernes de GPL avec protection thermique, selon les calculs de dimensionnement de l'Association of American Railroads), en raison de la montée en pression que peuvent entraîner les défauts.

Des simulations à l'aide du code IDA 2.1 ont été réalisées pour le cas d'un wagon-citerne (citerne, niveau de remplissage, feu, conditions initiales, etc. identiques) muni d'une soupape ayant une capacité d'écoulement de 3 500 pi^3/min. La première simulation concernait une citerne présentant 0 p. 100 de défaut (c.-à-d. aucun défaut dans la protection thermique) et un indice k = 0,30 W/mK. Cette simulation s'est interrompue avant les 100 minutes de durée du feu, soit après 80 minutes, en raison d'erreurs internes. À 80 minutes, la citerne était intégralement remplie et la pression était de 3,3 MPa (pression manométrique de 570 lb/po^2). Nous ne sommes pas certains que le modèle de remplissage intégral (écoulement liquide et bi-phasique par la soupape de sûreté) fonctionne correctement car nous ne disposons d'aucune donnée pour valider ce cas.

Le résultat de la modélisation donne à penser que la soupape de sûreté de 3 500 pi^3/min n'a pas une capacité suffisante pour les conditions théoriques de température et de conductivité thermique de la protection thermique. À la lumière de ces résultats, nous recommandons qu'aucun défaut ne soit considéré acceptable dans une citerne équipée d'une soupape de sûreté de 3 500 pi^3/min, jusqu'à ce que la question soit étudiée plus en détail.

Le wagon-citerne soumis à l'essai RAX 201 était équipé d'une soupape de sûreté de 34 900 pi^3/min. Pendant l'essai au feu, la pression a atteint une pression manométrique de 360 lb/po^2 (128 p. 100 de la pression d'ouverture). Cela signifie probablement que la soupape était légèrement sous-dimensionnée pour les paramètres de l'essai. Si la citerne avait été recouverte d'une jaquette en acier avec lame d'air, le flux thermique aurait été réduit de moitié environ, ce qui signifie que la capacité d'écoulement de la soupape aurait pu être réduite à environ 17 450 pi^3/min. Par ailleurs, si la citerne avait été complètement recouverte d'une protection thermique, le flux thermique aurait été diminué d'environ 90 p. 100, de sorte que l'on aurait pu se contenter d'une soupape de 3 500 pi^3/min. Cela en supposant que l'isolation thermique est dans un état irréprochable et que sa conductivité thermique moyenne est d'environ 0,15 W/mK dans la zone de la phase liquide. Cela s'applique à l'isolation en fibre céramique à une température moyenne de quelque 440 °C (c.-à-d., T paroi de la citerne = 80 °C et T jaquette = 800 °C).

Si les défauts de protection thermique d'un wagon-citerne sont situés dans l'espace liquide, la capacité de la soupape serait une fonction linéaire des dimensions des défauts dans l'espace liquide, entre ces deux valeurs. Par exemple, une citerne comportant des défauts sur 10 p. 100 de sa surface dans l'espace liquide devrait être équipée d'une soupape de sûreté de la capacité suivante :

$$pi^3/min_{\text{défaut 10 \%}} = 0{,}10(17\,450) + (1 - 0{,}1)(3\,500) = 4\,900\ pi^3/\text{min} \qquad (1)$$

Ces valeurs ne sont qu'approximatives. Des analyses complémentaires s'imposent.

5.5 Effet du niveau de remplissage

Un wagon-citerne dont la protection thermique présente des défauts peut se rompre si la zone dans laquelle sont situés les défauts atteint des températures critiques. Cela ne peut survenir que si le niveau de la phase liquide descend sous la zone dans laquelle est situé le défaut. La question est alors la suivante : jusqu'à quel point le niveau de liquide doit-il descendre sous le défaut pour que la température de la paroi devienne critique?

Au début, le wagon-citerne RAX 201 était rempli à environ 95 p. 100 et la rupture est survenue lorsque son niveau de remplissage est descendu à environ 50 p. 100. Les essais au feu menés par Birk et coll. [4] sur des citernes de 500 gallons comportant des défauts de protection thermique ont montré que des citernes pouvaient se rompre avec des niveaux de remplissage aussi élevés que 80 p. 100 lorsque le défaut de protection thermique était situé au sommet de la citerne. Birk et coll. [4] ont aussi mené des essais avec des citernes de 500 gallons remplies d'eau. Ils ont alors constaté que les parois

d'une citerne remplie à 50 p. 100 d'eau atteint des températures d'environ 50 °C plus élevées que celles d'une citerne remplie à 80 p. 100. Cet écart est dû à l'effet de refroidissement du liquide.

Selon le code IDA 2.1, les parois peuvent atteindre des températures dangereuses dans les zones défectueuses situées au sommet de la citerne, lorsque le niveau de remplissage descend au-dessous de 80 p. 100. Il s'agit d'une analyse prudente.

5.6 Propriétés de l'isolant

La zone défectueuse n'est pas l'unique facteur qui détermine la performance du système de protection thermique. Les propriétés du système de protection thermique intact influent aussi sur le comportement du système. Si la conductance thermique globale (kA/w, ou A = superficie globale) du système est élevée, le niveau de liquide descendra plus rapidement, dans un incendie, accroissant l'espace vapeur sujet à une hausse brusque de température. Dans un tel cas, il suffit d'un seul défaut critique dans l'espace vapeur pour que la rupture survienne. Ce rapport a pris en considération trois cas de conductivité thermique k : 0,15, 0,2 et 0,3 W/mK. Les renseignements sont insuffisants pour préciser laquelle de ces valeurs est la plus courante; par souci de prudence, la valeur la plus élevée de k (0,3 W/mK) devrait être utilisée. Dans ce cas, il suffit d'un seul défaut critique au sommet du wagon-citerne pour que survienne une rupture théorique dans les 100 minutes d'une exposition à des flammes enveloppantes.

6.0 Conclusions

Les conclusions formulées ci-après ont été tirées des essais au feu de citernes de 500 gallons présentant des défauts de protection thermique et de la modélisation mathématique de wagons-citernes de type 112J avec défauts.

i) Les essais au feu de citernes de propane de 500 gallons présentant des défauts simulés de la protection thermique ont révélé que même des défauts de petites dimensions peuvent entraîner la rupture de la citerne.

ii) Les essais au feu de citernes de 500 gallons présentant des défauts de protection thermique simulés ont permis de déterminer qu'un défaut d'aussi faibles dimensions que 1,2 m de longueur (dans l'axe de la citerne) sur environ 0,4 m de largeur est suffisant, en théorie, pour entraîner un amincissement localisé de la paroi et une rupture par fluage dans un wagon-citerne de type 112J dont le diamètre est de 3 m et la paroi, épaisse de 16 mm. Cela en supposant une contrainte périphérique d'environ 190 MPa.

iii) Un défaut de protection thermique ne constitue un problème, lors d'une exposition à un feu enveloppant, que s'il est situé dans l'espace vapeur. En d'autres mots, le niveau du liquide par rapport à l'emplacement du défaut est un facteur important.

La modélisation thermique a mené aux conclusions suivantes :

i) Les essais au feu de citernes de propane de 500 gallons (dans deux configurations : citerne de référence et citerne avec protection thermique défectueuse) menés en 2004 ont permis de valider de façon satisfaisante le code IDA 2.1.

ii) Les résultats obtenus avec le code IDA 2.1 concordent raisonnablement avec les résultats des essais au feu RAX 201 [4] d'un wagon-citerne en vraie grandeur sans protection thermique.

iii) Certains écarts ont été constatés entre la modélisation IDA 2.1 et les résultats d'essais. Ainsi, le code IDA 2.1 a tendance à surestimer la vitesse de montée en température des parois, et, par conséquent, à devancer de quelques minutes le moment de rupture, par rapport aux résultats des essais. Cet écart peut s'expliquer en partie par la façon dont le feu est modélisé. En effet, un feu réel n'atteint pas instantanément sa pleine intensité, tandis que dans le code IDA, le feu est à 100 p. 100 dès le moment 0.

iv) Le modèle semble prévoir de façon raisonnable et prudente la rupture de la citerne.

À cause de la complexité du problème, il est à peu près impossible de valider un modèle informatique comme le code IDA 2.1 pour toutes les conditions possibles. Il faut donc être prudent lorsque l'on utilise le code IDA 2.1 et ses résultats.

Les conclusions ci-après ont été tirées des travaux de modélisation de wagons-citernes présentant des défauts de protection thermique. Il a été supposé, à la lumière des résultats des essais au feu réalisés par Birk et coll. [4], qu'un défaut d'isolation est critique lorsqu'il mesure 1,2 m dans l'axe de la citerne (112J) sur 0,4 m de largeur.

i) Un défaut de protection thermique de dimensions critiques, s'il est situé dans l'espace vapeur du wagon-citerne, peut entraîner la rupture de la citerne lorsque celle-ci est accidentellement soumise à des flammes enveloppantes.

ii) La rupture d'un wagon-citerne qui comporte des défauts d'isolation ne dépend pas seulement de l'étendue et de l'emplacement des défauts, mais aussi de la qualité du reste de la protection (y compris toutes les liaisons thermiques entre la jaquette et le récipient intérieur de la citerne). Meilleure est la protection thermique de la citerne, plus elle est capable de survivre, malgré des défauts localisés. C'est que l'ensemble de la protection thermique détermine la vitesse à laquelle le niveau de liquide baisse dans la citerne lorsqu'elle est exposée au feu.

iii) La superficie totale admissible des défauts d'isolation est très fortement tributaire de la moyenne surfacique des propriétés de conduction thermique (c.-à-d. k/w, où k = conductivité thermique et w = épaisseur de l'isolant) de l'isolant thermique de la citerne exposée à des flammes. On estime cette valeur de conductivité thermique entre 0,15 et 0,30 W/mK dans le cas d'un matelas isolant en fibre céramique haute température exposé au feu.

iv) Une citerne protégée par un matelas isolant en fibre céramique de 13 mm d'épaisseur dont la moyenne surfacique de conductivité thermique est de 0,15 W/mK (dans des conditions d'incendie) peut probablement admettre des défauts de protection thermique couvrant de 8 p. 100 à 9 p. 100 de sa surface. Cela en supposant qu'il y a au moins un défaut critique dans l'espace vapeur. On suppose également que la soupape de sûreté a une capacité d'écoulement supérieure à environ 5 000 pi^3/min, à 110 p. 100 de sa pression d'ouverture (présumée à une pression manométrique de 280,5 lb/po^2).

v) Une citerne protégée par un matelas isolant en fibre céramique de 13 mm d'épaisseur dont la moyenne surfacique de conductivité thermique est de 0,20 W/mK (dans des conditions d'incendie) peut probablement admettre des défauts couvrant 4 p. 100 de sa surface. Cela en supposant qu'il y a au moins un défaut critique dans la zone de la phase gazeuse. On suppose également que la soupape de sûreté a une capacité d'écoulement supérieure à environ 4 000 pi^3/min, à 110 p. 100 de sa pression d'ouverture (présumée à une pression manométrique de 280,5 lb/po^2).

vi) Une citerne protégée par un matelas isolant en fibre céramique de 13 mm d'épaisseur dont la moyenne surfacique de conductivité thermique est de 0,30 W/mK (dans des conditions d'incendie) ne peut admettre aucun défaut critique (c.-à-d. mesurant plus de 1,2 m dans l'axe de la citerne sur 0,4 m de largeur). Cette conductivité thermique efficace est la valeur maximale admissible pour un matelas isolant de 13 mm d'épaisseur qui respecte les paramètres des essais standard sur plaque des systèmes de protection thermique. Si une citerne présente cette conductivité thermique moyenne,

une soupape de sûreté dont la capacité d'écoulement est de 3 500 pi^3/min est probablement inadéquate (la capacité d'écoulement est trop faible).

vii) Une citerne qui ne comporte aucun défaut de plus de 1,2 m x 0,4 m peut admettre des défauts couvrant une plus grande surface, mais la surface maximale doit être déterminée au cas par cas, en appliquant le code IDA 2.1 à la citerne en question. Il faut alors prélever des éprouvettes d'isolant afin de mesurer les indices *k* réels. Au moins 10 éprouvettes doivent être prélevées de façon à pouvoir déterminer un indice *k* véritablement représentatif.

viii) Aucun défaut ne doit être admis dans les wagons-citernes de type 112J équipés de soupapes de sûreté de 3 500 pi^3/min, à moins que l'on puisse caractériser avec précision la protection thermique globale.

Le lecteur doit se rappeler que les cas suivants n'ont pas été pris en compte dans l'étude :

i) défaillance des extrémités
ii) soupapes de sûreté défectueuses
iii) défauts dans le récipient intérieur
iv) corrosion
v) dommages dus à un impact
vi) feux de type «flamme de chalumeau»
vii) citernes renversées
viii) contact direct entre la jaquette et le récipient intérieur de la citerne

7.0 Recommandations

Les résultats consignés dans le présent rapport reposent très fortement sur le transfert thermique qui se produit dans l'espace vapeur lorsque la citerne et à des niveaux de remplissage élevés. Nous ne disposons que de très peu de données pour valider ces modèles de façon précise.

Pour poursuivre l'analyse présentée dans ce rapport, les travaux suivants s'imposent :

i) Mener des essais au feu de citernes remplies à des niveaux élevés, y compris de celles qui comportent des défauts de protection thermique.
ii) Mesurer les valeurs types de conductivité thermique k de l'isolant faisant partie du système de protection thermique d'un wagon-citerne, une fois installé. Ces mesures doivent être prises aux températures attendues lors d'expositions accidentelles au feu.
iii) Déterminer la fréquence des contacts directs entre la jaquette de la citerne et le récipient intérieur.
iv) Déterminer le comportement des soupapes de sûreté dans des conditions de remplissage intégral (c.-à-d. comment elles s'ouvrent et se referment, leur capacité d'écoulement de liquide et leur capacité d'écoulement bi-phasique, etc.).
v) Mesurer l'émissivité type de la paroi intérieure de citernes neuves et âgées.
vi) Mesurer ou obtenir les caractéristiques de réflexion de la surface de propane liquide.
vii) Examiner la formule actuelle de dimensionnement des soupapes de sûreté devant équiper des citernes comportant une protection thermique. Les simulations effectuées donnent à penser que les critères actuels sont peut-être trop laxistes.

Le code IDA 2.1 est en constante évolution. Il est suggéré d'intégrer les tâches suivantes aux travaux en cours :

i) Améliorer les modèles thermiques à deux et trois nœuds.
ii) Améliorer le modèle de rayonnement dans l'espace vapeur.
iii) Ajouter un modèle d'espace vapeur à deux nœuds pour les cas où on s'attend à une ouverture tardive de la soupape de sûreté.
iv) Valider les hypothèses concernant le modèle à remplissage intégral (capacité d'écoulement de la soupape de sûreté, bombement bi-phasique, etc.).
v) Ajouter d'autres produits au code.
vi) Améliorer l'interface utilisateur.

Références

1. Birk AM, 2005, *Thermal Model Upgrade for the Analysis of Defective Thermal Protection Systems,* TP 14368E, Transportation Development Centre, Transport Canada.
2. Yoon KT, Birk AM, 2004, *Computational Fluid Dynamics Analysis of Local Heating of Propane Tanks,* TP 14357E, Transportation Development Centre, Transport Canada.
3. Birk AM, Yoon KT, 2004, *High Temperature Stress-Rupture Tests of Sample Tank-Car Steels,* TP 14356E, Transportation Development Centre, Transport Canada.
4. Birk AM, Poirier D, Davison C, Wakelam C, 2005, *Tank-Car Thermal Protection Defect Assessment: Fire Tests of 500-Gallon Tanks with Thermal Protection Defects,* TP 14366E, Transportation Development Centre, Transport Canada.
5. Birk AM, Cunningham MH, 1999, *Thermographic Inspection of Tank-Car Insulation: Field Test Manual,* TP 13517E, Transportation Development Centre, Transport Canada.
6. Birk AM, Cunningham MH, 2000, *Tank-Car Insulation Defect Assessment Criteria: Thermal Analysis of Defects,* TP 13518E, Transportation Development Centre, Transport Canada.
7. Townsend W, Anderson CE, Zook J, Cowgill G, 1974, *Comparison of Thermally Coated and Uninsulated Rail Tank-Cars Filled with LPG Subjected to a Fire Environment,* FRA-OR&D 75-32, Federal Railroad Administration, U.S. Department of Transportation.
8. Balke C, Heller W, Konersmann R, Ludwig J, 1999, *Study of the Failure Limits of a Tank Car Filled with Liquefied Petroleum Gas Subjected to an Open Pool Fire Test,* BAM Project 3215, Federal Institute for Materials Research and Testing (BAM).
9. Anderson CE, 1982, *Rail Tank Car Safety by Fire Protection*, 6th International Fire Protection Seminar, Karlsruhe, Germany.
10. Holman JP, 1976, *Heat Transfer*, New York, McGraw Hill Book Company.
11. Ramskill PK, 1988, A Description of the ENGULF Computer Codes -- Codes to Model the Thermal Response of an LPG Tank Either Fully or Partially Engulfed by Fire, *Journal of Hazardous Materials* 20:177-96.
12. Aydemir NU, Magapu VK, Sousa ACM, Venart JES, 1988, Thermal Response Analysis of LPG Tanks Exposed to Fire, *Journal of Hazardous Materials* 20: 239-62.
13. Johnson MR, 1998, *Tank Car Thermal Analysis, Vol 1 User Manual, Vol 2 Technical Documentation,* DOT/FRA/ORD-98/09A and 09B, Federal Railroad Administration, U.S. Department of Transportation.
14. Birk AM, 2000, *Review of AFFTAC (Analysis of Fire Effects on Tank-Cars) Thermal Model,* TP 13539E, Transportation Development Centre, Transport Canada.

15. Anderson CE, Norris EB, 1974, *Fragmentation and Metallurgical Analysis of Tank-Car RAX 201,* FRA-OR&D 75-30, Federal Railroad Administration, U.S. Department of Transportation.

16. Birk AM, VanderSteen JDJ, 2003, *Burner Tests on Defective Thermal Protection Systems,* TP 14066E, Transportation Development Centre, Transport Canada.

17. Birk AM, VanderSteen JDJ, Davison C, Cunningham MH, Mirzazadeh I, 2003, *PRV Field Trials – The Effects of Fire Conditions and PRV Blowdown on Propane Tank Survivability in a Fire,* TP 14045E, Transportation Development Centre, Transport Canada.

18. 1973, *Phase II Report on Analysis of 1/5th Scale Fire Tests,* RA-11-5-26 US 6 AFI 17-73 ENG(PF), RPI-AAR Railroad Tank-Car Safety Research and Test Project.

19. Appleyard RD, 1980, *Testing and Evaluation of the EXPLOSAFE System as a Method of Controlling the Boiling Liquid Expanding (BLEVE),* TP 2740, Research and Development Centre, Transport Canada.

20. Droste B, Schoen W, 1988, Full Scale Fire Tests with Unprotected and Thermal Insulated LPG Storage Tanks, *Journal of Hazardous Materials* 20:41-54.

21. Moodie K, Cowley LT, Denny RB, Small LM, Williams I, 1988, Fire Engulfment Test of a 5 Tonne LPG Tank, *Journal of Hazardous Materials* 20:55-71.

22. Birk AM, 1995, Scale Effects with Fire Exposure of Pressure Liquefied Gas Tanks, *Journal of Loss Prevention in the Process Industries* 8(5):275-90.

23. Hadjisophocleous GV, Sousa ACM, Venart JES, 1990, A Study of the Effect of the Tank Diameter on the Thermal Stratification in LPG Tanks Subjected to Fire Engulfment, *Journal of Hazardous Materials* 25(1 + 2):19-31.

24. Bainbridge BL, Keltner NR, 1988, Heat Transfer to Large Objects in Large Pool Fires, *Journal of Hazardous Materials* 20:21-40.